

## Радиотелескоп декаметрового диапазона длин волн УРАН-2

А. В. Мень, Н. К. Шарькин, В. В. Захаренко,  
В. Г. Булацен<sup>1</sup>, А. И. Браженко<sup>1</sup>, Р. В. Ващишин<sup>1</sup>

Радиоастрономический институт НАН Украины,  
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4

<sup>1</sup>Гравиметрическая обсерватория Института геофизики НАН Украины,  
Украина, 36029, г. Полтава, ул. Мясоедова, 27/29  
E-mail: vrsl@mail.ru

Статья поступила в редакцию 4 сентября 2003 г.

В статье описывается антенная решетка радиотелескопа УРАН-2, который входит в систему радиоинтерферометров со сверхдлинной базой УРАН, предназначенных для изучения тонкой структуры источников космического излучения в декаметровом диапазоне длин волн. Приводятся схемы устройств фазирования и суммирования сигналов радиотелескопа и его основные параметры.

У статті описано антенну ґратку радіотелескопа УРАН-2, який входить до системи радіоінтерферометрів з наддовгою базою УРАН, призначених для вивчення тонкої структури джерел космічного радіовипромінювання у декаметровому діапазоні довжин хвиль. Наведено схеми пристроїв фазування і підсумовування сигналів радіотелескопа та його основні параметри.

### Введение

В настоящее время существуют самые разнообразные типы антенных систем, которые отличаются по конструкции, принципу действия и назначению. Чтобы обеспечить достаточную чувствительность при обнаружении очень малых плотностей потока излучения космических радиоисточников, необходимы антенны с большими апертурами. При измерениях, проводимых в декаметровом диапазоне длин волн, применяют фазлируемые антенные решетки. Но одиночные антенны имеют малую разрешающую способность, не позволяющую исследовать тонкую структуру радиоисточников. Поэтому для детального исследования распределения яркости последних используют методы радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), апертурного синтеза и суперсинтеза.

В декаметровом диапазоне существует единственная в мире система РСДБ УРАН, разработанная в РИ НАН Украины и рассчитанная на измерения угловых размеров источников порядка 1 угловой секунды. Она состоит из 5 антенных систем, размещенных на территории Украины. Кроме антенны радиотелескопа УТР-2, ориентированной в направлении север – юг (“С – Ю”), в ней используются еще четыре специальные антенны: УРАН-1, УРАН-2, УРАН-3 и УРАН-4.

Радиотелескоп УРАН-2 находится на расстоянии 153.2 км от радиотелескопа УТР-2 в с. Степановка Полтавской области и имеет координаты  $49^{\circ}39'50''$  с. ш. и  $36^{\circ}21'20''$  в. д. Введение в строй антенной системы этого телескопа в полном объеме состоялось в 2000 г. Так как он является наибольшим среди радиотелескопов УРАН для приема двух линейных поляризаций, то его дальнейшее использова-

ние в различных радиоастрономических программах потребовало провести работы по эталонированию его основных параметров в более широком по сравнению с другими антеннами сети УРАН диапазоне частот – от 9 до 32 МГц.

Целью настоящей работы является описание антенной системы радиотелескопа УРАН-2, а также результаты проведенного эталонирования его основных характеристик.

### 1. Антенная система радиотелескопа УРАН-2

Антенная система радиотелескопа УРАН-2, в отличие от других антенн УРАН [1] обеспечивает пространственную фильтрацию сигналов до  $3.5^\circ$  по азимуту  $A$  и до  $7^\circ$  по углу места  $\varepsilon$ . Разрешение интерферометра по азимуту  $A$  осуществляется антенной решеткой “С-Ю” радиотелескопа УТР-2, ширина луча которого в зенитном направлении равна  $0.5^\circ$  на частоте 25 МГц.

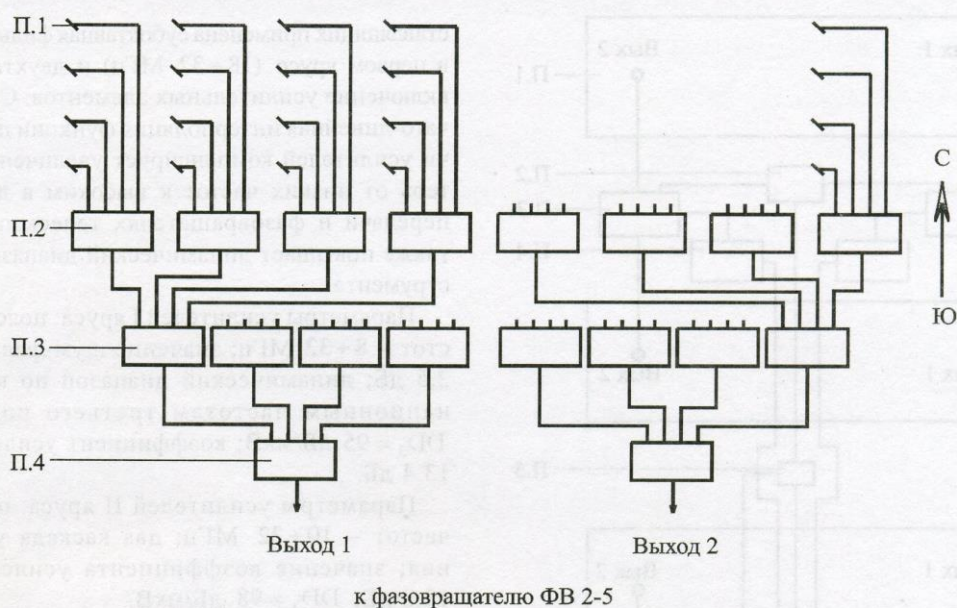
Антенна УРАН-2 выполнена в виде многоэлементной прямоугольной горизонтальной фазированной решетки с размерами  $238 \times 118$  м. В антенной решетке использованы широкополосные шунтовые турникетные элементы, состоящие из двух ортогональных вибраторов, расположенных под углом  $\pm 45^\circ$  к меридиану. Это дает возможность принимать одновременно две линейно-поляризованные составляющие сигнала, что позволяет учитывать влияние фарадеевского вращения плоскости поляризации волн в межпланетной плазме и ионосфере Земли на интерферометрические наблюдения. Вибраторы радиоинтерферометра УРАН-2 в количестве 512 штук образуют 16 рядов, ориентированных вдоль параллели. В каждом ряду расположено 32 вибратора, расстояние между ними – 7.5 м вдоль параллели и меридиана, высота их размещения над поверхностью Земли – 3.5 м. Размеры вибратора: диаметр – 1.8 м, длина – 8 м. На стойке каждого вибратора в герметичных корпусах расположено по два симметрирующих устройства, обеспечивающих согласование входных импедансов с волновым сопротивлением системы фазирования и переход

от симметричных входных цепей вибратора к асимметричному коаксиальному кабелю. Антенная решетка разделена на четыре одинаковых секции.

### 2. Система фазирования антенной решетки УРАН-2

В антенной решетке радиотелескопа УРАН-2 для управления диаграммой направленности (ДН) применен метод временного фазирования с использованием линий временной задержки для компенсации опережения сигналов в излучателях, позволяющий вести прием для большинства углов верхней полусферы в широкой полосе частот и одновременно на нескольких разнесенных частотах.

Фазирование антенной решетки осуществляется по двум угловым координатам (направляющим косинусам)  $l = \cos \varepsilon \sin A$ , в секторе  $-1 \leq l \leq 1$ , и  $m = \cos \varepsilon \cos A$ , в секторе  $-1 \leq m \leq 1$ , для каждой из двух линейных поляризаций. Системы фазирования и суммирования сигналов по координатам  $l$  и  $m$ , выполненные по многоэтажным схемам, обеспечивают существенную экономию высокочастотных кабелей. Система фазирования по  $m$  – асинхронная и состоит из трех этажей фазирования. Первый этаж имеет четыре временных разряда (16 положений луча в секторе  $-1 \leq m \leq 1$ ), второй – пять временных разрядов (32 положения луча в секторе  $-1 \leq m \leq 1$ ), и третий – шесть временных разрядов (64 положения луча в секторе  $-1 \leq m \leq 1$ ). Система фазирования по  $l$  – синхронная трехэтажная, имеющая семь временных разрядов (128 положений луча в секторе  $-1 \leq l \leq 1$ ). Дискретности временных задержек в каждом этаже фазирования выбраны таким образом, чтобы максимальное падение коэффициента направленного действия (КНД) и уменьшение эффективной площади антенны  $A_{\text{эфф}}$  из-за дискретного способа управления лучом по координатам  $l$  и  $m$  не превышало 3.0 % на частоте 25 МГц. Функциональная схема антенной секции для одной поляризации приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Функциональная схема антенной секции для одной поляризации:  
 П.1 – 128 излучателей, П.2 – 32 фазовращателя ФВ4-4, П.3 – 8 фазовращателей ФВ 4-7 I, П.4 – 2 фазовращателя ФВ 4-7 II

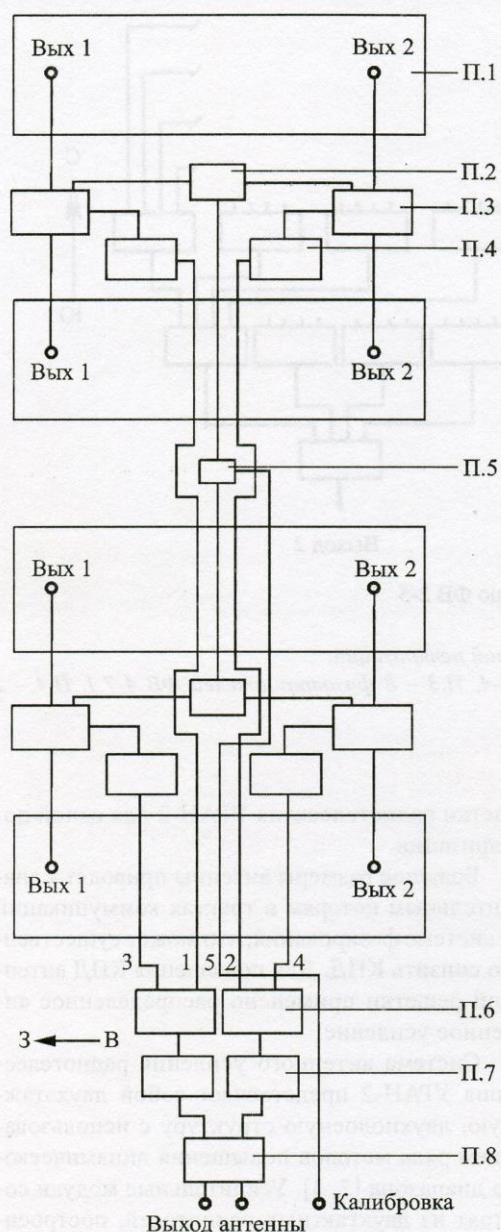
Сигналы с выхода каждого вибратора фазированы и суммируются вдоль меридиана первым этажом фазирования по  $m$  (фазовращатели ФВ 4-4), затем вдоль параллели первым и вторым этажом синхронных фазовращателей по  $l$  (ФВ 4-7-I и ФВ 4-7-II). Таким образом, в каждую антенную секцию радиотелескопа УРАН-2 входят 32 фазовращателя первого этапа фазирования и суммирования по  $m$ , 8 фазовращателей первого и 2 фазовращателя второго этапа фазирования и суммирования по  $l$ . Для второй поляризации функциональная схема идентична, однотипные фазовращатели обеих линейных поляризаций конструктивно расположены в одном герметичном корпусе. Одноименные разряды всех фазовращателей по каждой из угловых координат управляются одновременно.

Сигналы с выходов фазовращателей ФВ 4-7 II фазированы и суммируются вторым этажом фазирования по координате  $m$  с помощью четырех фазовращателей ФВ 2-5. На рис. 2 показана функциональная схема суммирования и фазирования четырех секций антенной ре-

шетки радиотелескопа УРАН-2 для одной поляризации.

Большие размеры антенны приводят к значительным потерям в трактах коммуникаций и системе фазирования, что может существенно снизить КПД. Для повышения КПД антенной решетке применено распределенное антенное усиление.

Система антенного усиления радиотелескопа УРАН-2 представляет собой двухэтажную, двухполосную структуру с использованием ряда методов повышения динамического диапазона [2, 3]. Усилительные модули состоят из двухтактных усилителей, построенных по схеме с автотрансформаторной отрицательной обратной связью (ООС) без потерь. Первый каскад модуля первого яруса за счет выбранного оптимального по шумам режима транзисторов обеспечивает высокую чувствительность всего инструмента, а остальные каскады усиления запитаны током, обеспечивающим максимальную линейность характеристик усилителей. Для подавления четных интермодуляционных и комбинационных со-



**Рис. 2.** Функциональная схема суммирования и фазирования четырех секций антенной решетки УРАН-2 для одной поляризации:

П.1 – 4 секции по 128 излучателей, П.2 – 2 гибридных разветвителя калибровочного сигнала, П.3 – 4 фазовращателя ФВ2-5, П.4 – 4 антенных усилителя первого яруса, П.5 – гибридный разветвитель калибровочного сигнала центрального колодца, П.6 – 2 фазовращателя ФВ2-6, П.7 – 2 антенных усилителя 2-го яруса, П.8 – фазовращатель ФВ2-7

ставляющих применена суббандная фильтрация в первом ярусе ( $18 \div 32$  МГц) и двухтактное включение усилительных элементов. Ступенчато-линейная интерполяция функции передачи усилителей компенсирует увеличение потерь от низких частот к высоким в линиях передачи и фазовращателях телескопа, что также повышает динамический диапазон инструмента.

Параметры усилителей I яруса: полоса частот –  $8 \div 32$  МГц; значение шум-фактора – 2.5 дБ; динамический диапазон по комбинационным частотам третьего порядка  $DD_3 = 95$  дБ/мкВ; коэффициент усиления – 13.4 дБ.

Параметры усилителей II яруса: полоса частот –  $10 \div 32$  МГц; два каскада усиления; значение коэффициента усиления – 13.8 дБ;  $DD_3 = 98$  дБ/мкВ.

Первый ярус усиления размещается на антенном поле после фазовращателей ФВ 2-5 и компенсирует потери сигнала от вибраторов до входов антенных усилителей. Второй ярус усилителей размещается после фазовращателя ФВ 2-6.

С выходов усилителей первого яруса сигналы по магистральным кабелям 1, 2, 3 и 4 (тип кабеля РК-75-13-11, длина – 150 м) поступают на третий этаж фазирования и суммирования по координате  $m$  (ФВ 2-6). Первый фазовращатель ФВ 2-6 фазировает и суммирует сигналы 256 излучателей западной половины антенной решетки, а второй фазовращатель ФВ 2-6 – 256 излучателей восточной половины. Результирующие сигналы западной и восточной половин антенной решетки поступают на третий этаж синхронного фазирования по координате  $l$  – фазовращатель ФВ 2-7.

Сигналы для калибровки радиотелескопа от эталонного шумового генератора (рис. 2) подаются по калибровочному кабелю 5 длиной 150 м в центральный колодец и после деления гибридными разветвителями на четыре канала поступают на входы “калибровка” фазовращателей ФВ 2-5. С фазовращателей, в которых осуществляется коммутация режима “калибровка/работа”, сигналы подаются на антенные усилители первого яруса. Для измерения абсолютных плотностей потока ра-

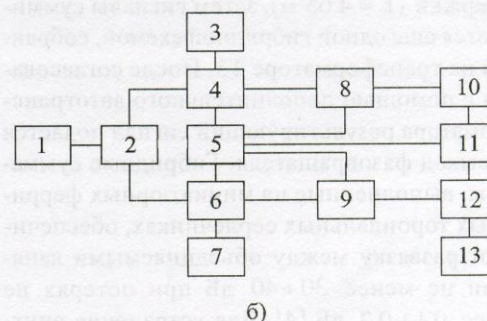
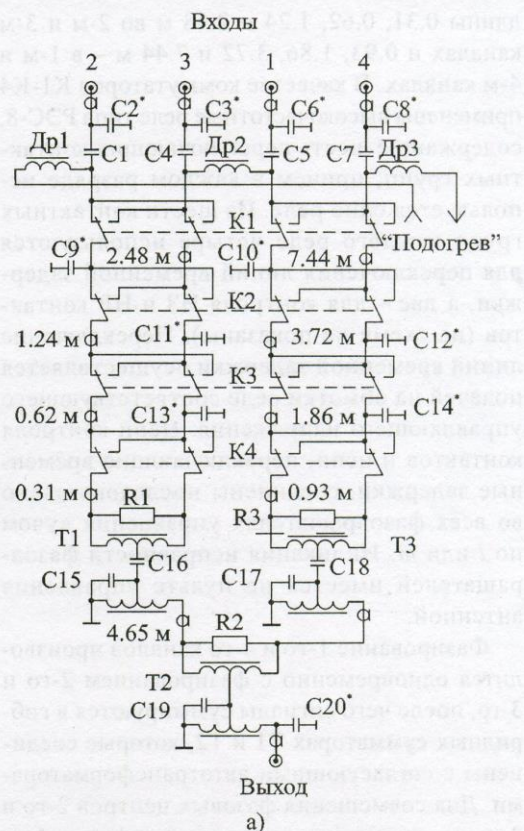
диоизлучения космических источников проведены измерения ослабления сигнала в цепях калибровки до входа антенных усилителей первого яруса на рабочих частотах интерферометра.

Управление положением луча по координатам  $l$  и  $m$  осуществляется с помощью ЭВМ либо вручную.

Для повышения надежности системы фазирования и суммирования сигналов радиотелескопа УРАН-2 предусмотрены защита обмоток реле фазовращателей от перегрузки, индикация прохождения сигнала через контактные группы реле, переключающие временные задержки, а также индикация нормально замкнутых (НЗ) и нормально разомкнутых (НР) контактов реле отдельно для каждой секции из 128 излучателей, расположенных в 4-х рядах по 32 вибратора вдоль параллели, что позволяет оперативно обнаруживать и устранять неисправности в системе фазирования.

В системе фазирования используются фазовращатели с фиксированным фазовым центром, когда между двумя фазуемыми входами всегда включена полная (результатирующая) временная задержка, т. е. при фазировании меняется лишь соотношение задержек между каналами. При этом фаза результирующего сигнала двух каналов неизменна. Отметим, что при использовании в системе управления лучом антенной решетки фазовращателей с фиксированным фазовым центром произведение коэффициентов КНД и КПД при изменении ориентировки луча в пространстве изменяется существенно меньше, чем при применении фазовращателей с переключаемым фазовым центром.

В качестве примера рассмотрим принципиальную схему фазирования и суммирования высокочастотных сигналов фазовращателя ФВ 4-4 для одной поляризации (рис. 3, а). Сигналы для фазирования и суммирования поступают от четырех вибраторов решетки на четыре ячейки (разряды) переключаемой линии временной задержки. В качестве элементов, обеспечивающих задержку сигналов во времени, используются отрезки высокочастотного коаксиального кабеля РК 75-9-12, имеющие



**Рис. 3.** Устройства системы фазирования: а) принципиальная схема фазовращателя ФВ4-4; б) функциональная схема пульта управления: 1 – ЭВМ; 2 – схема сопряжения с ЭВМ; 3, 7 – линии переключателей ручного управления лучом по координатам  $l$  и  $m$ ; 4 – коммутатор по  $l$ ; 5 – схема сигнализации; 6 – коммутатор по  $m$ ; 8, 9 – блоки ключей; 10 – реле фазовращателей системы фазирования по  $l$ ; 11 – схема контроля по  $l$  и  $m$ ; 12 – реле фазовращателей системы фазирования по  $m$ ; 13 – схема управления питанием обмоток реле

длины 0.31, 0.62, 1.24 и 2.48 м во 2-м и 3-м каналах и 0.93, 1.86, 3.72 и 7.44 м – в 1-м и 4-м каналах. В качестве коммутаторов К1-К4 применены высокочастотные реле типа РЭС-8, содержащие шесть переключающих контактных групп, причем в каждом разряде используется одно реле. Из шести контактных групп каждого реле четыре используются для переключения линий временной задержки, а две – для контроля НЗ и НР контактов (на схеме не показаны). Переключение линий временной задержки осуществляется подачей на обмотки реле соответствующего управляющего напряжения. Цепи контроля контактов и цепи, переключающие временные задержки, соединены последовательно во всех фазовращателях управления лучом по  $l$  или  $m$ . Индикация исправности фазовращателей имеется на пульте управления антенной.

Фазирование 1-го и 4-го каналов производится одновременно с фазированием 2-го и 3-го, после чего сигналы суммируются в гибридных сумматорах Т1 и Т2, которые соединены с согласующими автотрансформаторами. Для совмещения фазовых центров 2-го и 3-го каналов с фазовым центром 1-го и 4-го каналов используется фиксированная линия задержки ( $L = 4.65$  м), затем сигналы суммируются еще одной гибридной схемой, собранной на трансформаторе Т3. После согласования с помощью дополнительного автотрансформатора результирующий сигнал подается на выход фазовращателя. Гибридные сумматоры, выполненные на миниатюрных ферритовых тороидальных сердечниках, обеспечивают развязку между объединяемыми каналами не менее 30÷40 дБ при потерях не более 0.1÷0.2 дБ [4]. Для устранения внутренних отражений распределенные индуктивности и емкости контактной системы реле, соединительные цепи и воздушные линии согласуются с волновым сопротивлением тракта (75 Ом) с помощью дополнительных емкостей  $C^*$ .

Во всех фазовращателях системы фазирования для обеспечения минимального переходного сопротивления через контакты реле, переключающих временные задержки, пропуска-

ется постоянный ток “подогрева”  $60 \div 80$  мА. Одновременно с этим наличие тока “подогрева” в цепи контактов реле предоставляет информацию об исправности высокочастотного тракта фазовращателей. В рассматриваемом фазовращателе ФВ 4-4 ток “подогрева” подается через высокочастотные дроссели Др. 1, Др. 2 и Др. 3. Применяемые фазовращатели с фиксированным фазовым центром управляются в двоичном коде Грея [5].

Функциональная схема пульта управления системой фазирования представлена на рис. 3, б. Двоичный код управления с ЭВМ 1 подается на схему сопряжения с ЭВМ 2, которая выполняет функции буфера, обеспечивает электрическую развязку сигнальных цепей ЭВМ от пульта управления и формирует стандартные для транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) уровни сигналов. С выхода схемы сопряжения 2 двоичный код поступает на коммутаторы 4 по координате  $l$  и 6 – по  $m$ , либо сюда же поступает двоичный код управления, введенный вручную с линейек переключателей 3 и 7, расположенных на передней панели пульта управления. Схема обеспечивает коммутацию поступившего двоичного кода, пересчет стандартного двоичного кода в код Грея, а также формирование сигнала ошибки при неисправностях НЗ либо НР контактов реле.

Полученный в 4 и 6 код Грея подается на блоки ключей 8 и 9, в которых производится коммутация напряжения переключения реле фазовращателей системы фазирования 10 по  $l$  и 12 по  $m$ . В этих же блоках собраны схема защиты от перегрузки по току и напряжению обмоток реле, коммутирующих временные задержки, и схема формирования сигнала ошибки при срабатывании какой-либо из защит. Сигнал ошибки в дальнейшем подается на схему сигнализации 5. Защита срабатывает при внезапном исчезновении напряжения питания обмоток реле фазовращателей, при несрабатывании силового ключа по управляющему сигналу или при ложном его срабатывании (пробое). Индикация кода Грея выведена на панель пульта управления.

Для обеспечения оптимальной работы реле фазовращателей и продления срока их служ-

бы, снижения потребляемого тока и обеспечения необходимого температурного баланса блоков питания по координате  $m$  в схеме управления питанием обмоток реле 13, после их включения, предусмотрена подача с секундной задержкой напряжения удержания, равно половине напряжения питания.

Схема контроля 11 по  $l$  и  $m$  позволяет оперативно контролировать исправность следующих цепей антенной решетки радиотелескопа УРАН-2: подогрева, высокочастотных каналов, НЗ и НР контактов реле в фазовращателях. Кроме того, предусмотрены подача импульса для прожига образовавшейся пленки окислов на контактах реле, а также формирование сигнала ошибки при обнаруженных неисправностях.

Схема сигнализации 5 предназначена для обработки поступающих сигналов ошибки и формирования сигнала неисправности.

### 3. Характеристики антенны радиотелескопа УРАН-2

Расчетные значения КНД, КПД, ДН антенной решетки радиоинтерферометра УРАН-2, также как и других радиоинтерферометров системы УРАН, обеспечиваются точным поддержанием требуемых значений амплитуд и фаз высокочастотных токов вибраторов. Точность расчетного токораспределения определяется как системой фазирования и суммирования, так и степенью согласования системы фазирования с излучателями антенной решетки. Для согласования излучателей с системой фазирования проведены измерения их входных импедансов, разработаны согласующие

реактивные устройства, позволяющие уменьшить среднее значение модуля коэффициентов отражения  $\langle |\Gamma| \rangle$  примерно в три раза.

Для определения потерь в антенной решетке, а также для выяснения разброса амплитуд и фаз токов на излучателях проведены измерения падающих волн напряжения на входе согласующих устройств вибраторов согласно методике, описанной в [5]. Среднеквадратичные отклонения по фазе и амплитуде волн на частотах 25 и 16.7 МГц, усредненные по двум поляризациям для различных значений координаты  $l$ , приведены в табл. 1.

Среднеквадратичные ошибки по координате  $m$  не превышают ошибок по координате  $l$ .

КПД  $\eta$  определяется согласованием излучателей с системой фазирования, потерями и рассогласованием в системе фазирования, потерями в коммуникационных кабелях, идущих от вибратора к входным цепям антенных усилителей, а также потерями в поверхности раздела (влияние земли):

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 (1 - \langle |\Gamma|^2 \rangle),$$

где  $\eta_1 = \sum_{n=1}^N K_n$ ,  $K_n = \eta_{1n} / N$ . Здесь  $K_n$  – коэффициент передачи мощности падающей волны от входной цепи согласующего устройства  $n$ -го излучателя к входу антенных усилителей 1-го яруса;  $\eta_{1n}$  – КПД тракта  $n$ -го излучателя;  $\eta_2$  – КПД согласующего и симметрирующего устройств;  $\eta_3$  – КПД, определяемый потерями в поверхности раздела;  $\langle |\Gamma|^2 \rangle$  – средний квадрат модуля коэффициента отражения

Таблица 1. Среднеквадратичные отклонения по фазе и амплитуде волн на частотах 25 и 16.7 МГц, усредненные по двум поляризациям для различных значений координаты  $l$

	$f = 25 \text{ МГц}$				$f = 16.7 \text{ МГц}$			
	0	0.3	0.8	-0.6	0	0.3	0.8	-0.6
$\sigma_\varphi, \text{ }^\circ$	3.2	4.1	4.7	4.2	2.6	2.8	3.8	3.0
$\sigma_A, \text{ дБ}$	0.24	0.43	1.03	0.71	0.3	0.41	0.76	0.59

**Таблица 2.** Зависимость КПД  $\eta_2$  согласующих и симметрирующих устройств от частоты

$f$ , МГц	32	28.5	25	20	18	16.7	14.7	12.6	10	8.93
$\eta_2$	0.66	0.74	0.81	0.84	0.84	0.84	0.84	0.83	0.83	0.83

на входе согласующих устройств. Значение  $\eta_2$  зависит только от частоты, результаты экспериментального измерения этой зависимости приведены в табл. 2.

Потери, связанные с влиянием земли, определяемые отношением мощности, излученной антенной в верхнюю полусферу, к мощности, подведенной к вибраторам, находятся расчетным путем [6, 7]. В зависимости от свойств почвы, частоты и направления луча значение  $\eta_3$  может изменяться в пределах от 0.5 до 0.8, возрастая с ростом частоты.

Значение  $\langle |\Gamma|^2 \rangle$  определено экспериментально на разных частотах для различных координат  $l$  и  $m$  путем измерения коэффициентов отражений на входах каждого из 36 излучателей, расположенных внутри антенной решетки радиотелескопа УРАН-2 для исключения искажения за счет краевых эффектов и надежной статистики. В рабочем диапазоне частот при небольших отклонениях луча от зенитного направления ( $\leq 45^\circ$ ) значение модуля коэффициента отражения не превышает  $0.4 \div 0.5$ . Результирующие зависимости  $1 - \langle |\Gamma|^2 \rangle$  от  $m$  для различных значений координаты  $l$  и частоты  $f$  приведены на рис. 4.

Зависимость КПД  $\eta_1$  от ориентации луча выражена слабо из-за того, что в системе фазирования применены фазовращатели с фиксированным фазовым центром, зависимость от частоты значительно сильнее: с ростом частоты от 10 до 32 МГц значение  $\eta_1$  монотонно падает почти в два раза. Это объясняется существенной частотной зависимостью затухания в фазирующих и коммуникационных кабелях. Зависимость полного КПД от направления луча определяется преимущественно значением  $1 - \langle |\Gamma|^2 \rangle$ , а также частотой – КПД возрастает с уменьшением последней. Зависимость от наклона луча результирующего КПД  $\eta$  без учета

КПД поверхности раздела  $\eta_3$  для разных частот, усредненная для двух поляризаций, представлена на рис. 5, а-г.

Как было указано выше, для реализации максимальной чувствительности радиотелескопа и компенсации потерь в кабельных коммуникациях и фазовращателях на выходе каждого фазовращателя ФВ 2-5 установлены антенные усилители первого яруса. Потери сигнала в цепях после антенных усилителей первого яруса учитываются градуировками радиотелескопа (см. рис. 2). КПД цепей калибровки  $\eta_k$  радиотелескопа УРАН-2 представлены на рис. 5, д. Для обеспечения оптимального соотношения сигнал/шум на входе приемных устройств используется второй ярус антенных усилителей, который размещается после ФВ 2-6.

#### 4. Диаграмма направленности антенной решетки УРАН-2

ДН радиотелескопа УРАН-2 по полю без учета амплитудно-фазовых ошибок определяется выражением:

$$f(l, m) = \left[ 1 - \frac{(l \pm m)^2}{2} \right]^{1/2} \sin \left[ \frac{7\pi h}{\lambda} \sqrt{1 - l^2 - m^2} \right] \times \\ \times \frac{\sin \left[ \frac{4\pi d}{\lambda} (m - m_0) \right]}{4 \sin \left[ \frac{\pi d}{\lambda} (m - m_0) \right]} \cos \left[ \frac{4\pi d}{\lambda} (m - m_1) \right] \times \\ \times \cos \left[ \frac{8\pi d}{\lambda} (m - m_2) \right] \frac{\sin \left[ \frac{32\pi d}{\lambda} (l - l_0) \right]}{32 \sin \left[ \frac{\pi d}{\lambda} (l - l_0) \right]}$$



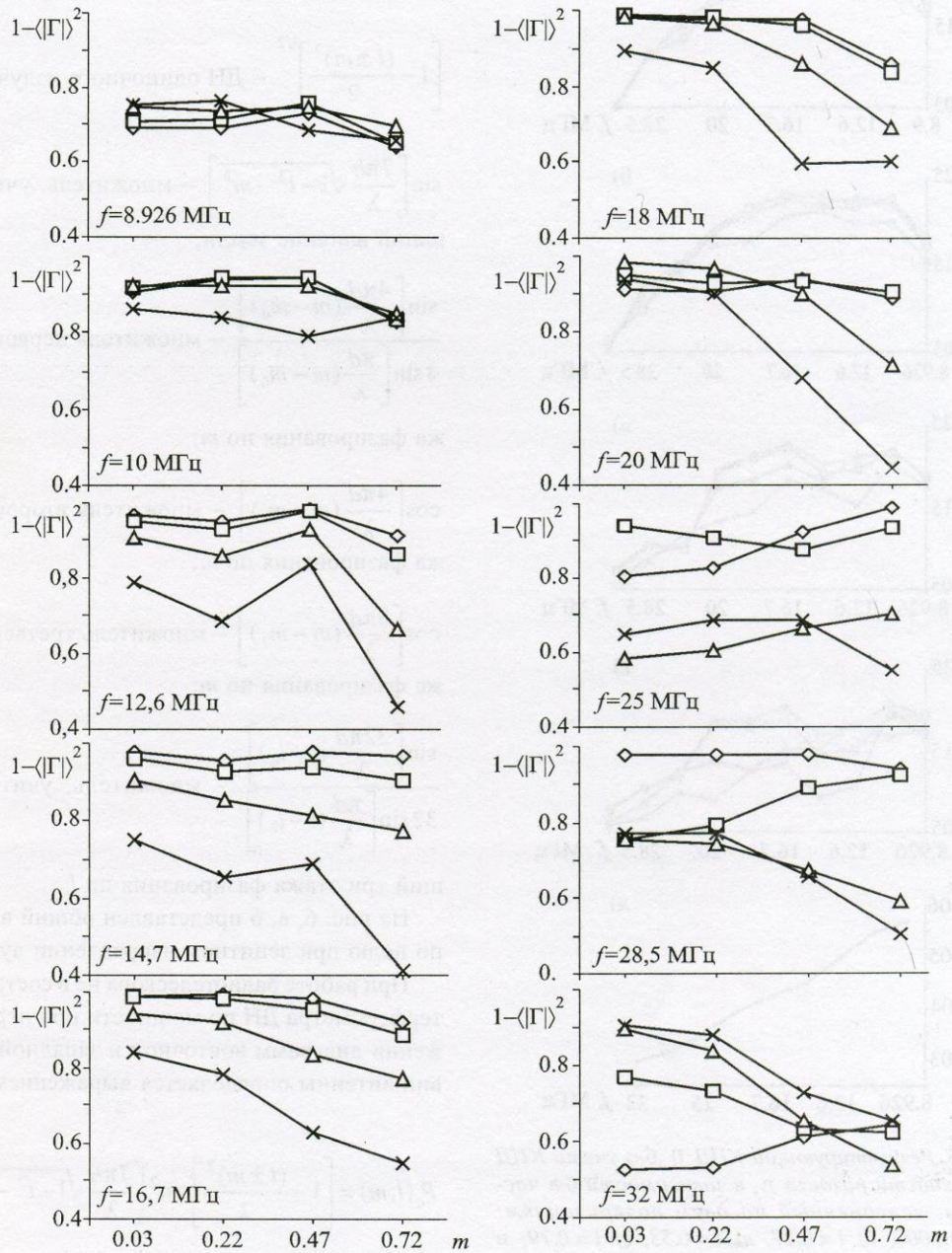
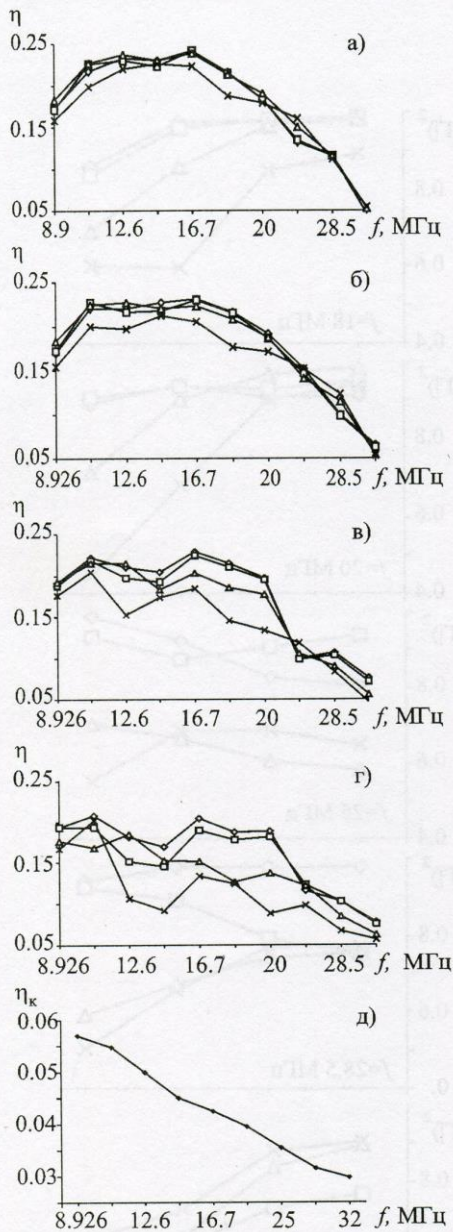


Рис. 4. Зависимость  $1 - \langle |\Gamma|^2 \rangle$  от отклонения луча от зенитного направления по координате  $m$  для различных значений частоты и координаты  $l$ : ромб -  $l = 0.008$ , прямоугольник -  $l = 0.27$ , треугольник -  $l = 0.53$ , крест -  $l = 0.79$



**Рис. 5.** Результирующий КПД  $\eta$  без учета КПД поверхности раздела  $\eta_3$  в зависимости от частоты, усредненный по двум поляризациям: а)  $l = 0.008$ , б)  $l = 0.27$ , в)  $l = 0.53$ , г)  $l = 0.79$ ; и КПД цепей калибровки  $\eta_k$  до входа АУ-1, усредненный по 4-м секциям (д). Разные символы соответствуют различному отклонению луча от зенитного направления по координате  $m$ : ромб –  $m = 0.03$ , прямоугольник –  $m = 0.22$ , треугольник –  $m = 0.47$ , крест –  $m = 0.72$

где  $d = 7.5$  м – расстояние между излучателями вдоль параллели и меридиана;  $h$  – высота подвеса антенны, м;  $\lambda$  – длина волны, м;

$$\left[ 1 - \frac{(l \pm m)^2}{2} \right]^{1/2} \text{ – ДН одиночного излучателя;}$$

$$\sin \left[ \frac{7\pi h}{\lambda} \sqrt{1 - l^2 - m^2} \right] \text{ – множитель, учитывающий влияние земли;}$$

$$\frac{\sin \left[ \frac{4\pi d}{\lambda} (m - m_0) \right]}{4 \sin \left[ \frac{\pi d}{\lambda} (m - m_0) \right]} \text{ – множитель первого этажа фазирования по } m;$$

жа фазирования по  $m$ ;

$$\cos \left[ \frac{4\pi d}{\lambda} (m - m_1) \right] \text{ – множитель второго этажа фазирования по } m;$$

$$\cos \left[ \frac{8\pi d}{\lambda} (m - m_2) \right] \text{ – множитель третьего этажа фазирования по } m;$$

$$\frac{\sin \left[ \frac{32\pi d}{\lambda} (l - l_0) \right]}{32 \sin \left[ \frac{\pi d}{\lambda} (l - l_0) \right]} \text{ – множитель, учитывающий три этажа фазирования по } l.$$

На рис. 6, а, б представлен общий вид ДН по полю при зенитном направлении луча.

При работе радиотелескопа не в составе интерферометра ДН по мощности при перемножении диаграмм восточной и западной половин антенны определяется выражением:

$$P_n(l, m) = \left[ 1 - \frac{(l \pm m)^2}{2} \right] \sin^2 \left[ \frac{7\pi h}{\lambda} \sqrt{1 - l^2 - m^2} \right] \times \frac{\sin^2 \left[ \frac{4\pi d}{\lambda} (m - m_0) \right]}{16 \sin^2 \left[ \frac{\pi d}{\lambda} (m - m_0) \right]} \cos^2 \left[ \frac{4\pi d}{\lambda} (m - m_1) \right] \times$$

$$\times \cos^2 \left[ \frac{8\pi d}{\lambda} (m - m_2) \right] \frac{\sin^2 \left[ \frac{16\pi d}{\lambda} (l - l_0) \right]}{256 \sin^2 \left[ \frac{\pi d}{\lambda} (l - l_0) \right]} \times$$

$$\times \cos \left[ \frac{32\pi d}{\lambda} (l - l_0) \right],$$

где  $\cos \left[ \frac{32\pi d}{\lambda} (l - l_0) \right]$  – множитель фазирования восточной и западной половин антенны.

ДН антенны по мощности  $P_n(l, m)$ , как известно, определяет коэффициент направленного действия  $D$ :

$$D = \frac{4\pi}{\iint_{4\pi} P_n(l, m) d\Omega},$$

где  $\Omega$  – телесный угол.

Эффективная площадь антенной решетки

$$A_{\text{эфф}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D.$$

Зависимость  $A_{\text{эфф}}$  от частоты для обеих поляризацій без учета амплитудно-фазовых ошибок, КПД  $\eta$  и влияния земли представлена на рис. 6, в.

Зная эффективную площадь антенны  $A_{\text{эфф}}$ , можно определить плотность потока источника космического радиоизлучения:

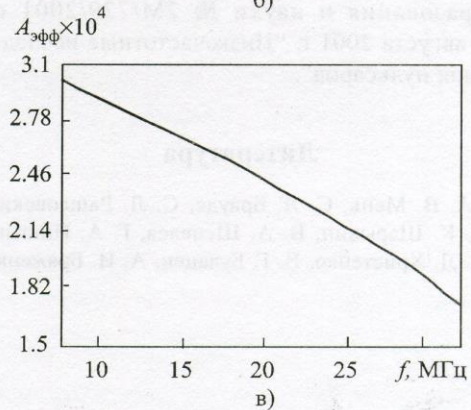
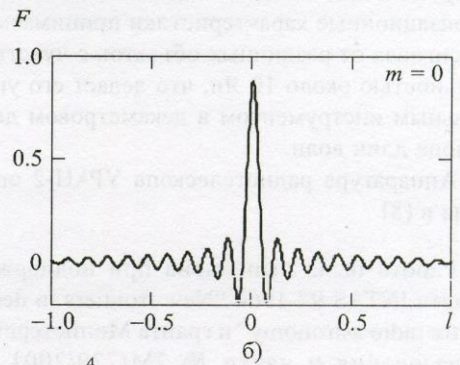
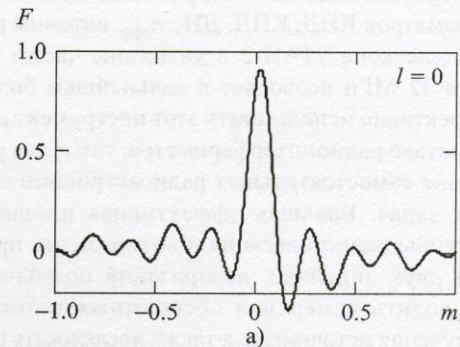
$$S = \frac{2P_{\text{max}} \eta_k}{A_{\text{эфф}} \eta},$$

где  $P_{\text{max}}$  – спектральная плотность мощности шумового генератора на входе АУ-1, которая соответствует уровню сигнала от источника космического излучения при его прохождении через максимум ДН.

Значения  $A_{\text{эфф}}$ , КНД и ДН антенной решетки определялись как расчетным, так и экспериментальным путем по излучению ин-

тенсивных источников космического радиоизлучения.

Максимальное падение КНД антенной решетки из-за разброса амплитуд и фаз нерав-



**Рис. 6.** Характеристики антенной решетки УРАН-2 для зенитного направления луча: сечение ДН по полю на частоте 25 МГц по координате  $m$  (а); по координате  $l$  (б); зависимость расчетной эффективной площади антенной решетки от частоты для обеих поляризацій без учета земли и коэффициента полезного действия  $\eta$  (в)

номерного распределения возбуждения излучателей и влияния земли не превышает 15 %.

### 5. Выводы

Проведенное эталонирование основных параметров КНД, КПД, ДН,  $A_{эфф}$  антенны радиотелескопа УРАН-2 в диапазоне частот от 9 до 32 МГц позволяет в дальнейшем более эффективно использовать этот инструмент как в составе радиоинтерферометра, так и для решения самостоятельных радиоастрономических задач. Большая эффективная площадь антенны радиотелескопа и возможность приема двух линейных поляризацій позволяют проводить измерения абсолютных потоков излучения источников, а также исследовать поляризационные характеристики принимаемого сигнала от различных объектов с чувствительностью около 10 Ян, что делает его уникальным инструментом в дециметровом диапазоне длин волн.

Аппаратура радиотелескопа УРАН-2 описана в [8].

Работа была выполнена при поддержке гранта INTAS 97-1964 "New frontiers in decametre radio astronomy" и гранта Министерства образования и науки № 2М/729/2001 от 17 августа 2001 г. "Низкочастотные исследования пульсаров".

### Литература

1. А. В. Мень, С. Я. Брауде, С. Л. Рашковский, Н. К. Шарыкин, В. А. Шепелев, Г. А. Инютин, А. Д. Христенко, В. Г. Булацен, А. И. Браженко,

- В. В. Кошевой, Ю. В. Романчев, В. П. Цесевич, В. В. Галанин. Радиофизика и радиоастрономия. 1977, **2**, №4, с. 385-401.
2. Е. Р. Abranin, Yu. M. Bruck, V. V. Zakharenko, A. A. Konovalenko. Experimental Astronomy. 2001, **11**, pp. 85-112.
3. Э. П. Абранин, Ю. М. Брук, В. В. Захаренко, А. А. Коноваленко. Радиофизика и Радиоастрономия. 1997, **2**, №1, с. 95-102.
4. Ю. М. Брук, Г. А. Инютин. Сборник "Антенны". Под ред. А. А. Пистолькорса. Москва, Связь, 1978, вып. 26, с. 91-107.
5. А. В. Мень, Л. Г. Содин, Н. К. Шарыкин, Ю. М. Брук, П. А. Мельяновский, Г. А. Инютин, Н. Ю. Гончаров. Сборник "Антенны". Под ред. А. А. Пистолькорса. Москва, Связь, 1978, вып. 26, с. 15-57.
6. Л. Г. Содин. Изв. вузов. Радиофизика. 1968, **11**, №1, с. 101-109.
7. Л. Г. Содин. Сборник "Антенны". Под ред. А. А. Пистолькорса. Москва, Связь, 1974, вып. 20, с. 72-84.
8. А. В. Мень, С. Л. Рашковский, В. А. Шепелев, А. С. Белов, В. А. Шевченко. Радиофизика и радиоастрономия. 1998, **3**, №3, с. 284-293.

### Decameter Wavelength Radio Telescope URAN-2

A. V. Megn, N. K. Sharykin,  
V. V. Zakharenko, V. G. Bulatsen,  
A. I. Brazhenko, R. V. Vaschishin

The URAN-2 radio telescope belonging to the VLBI system URAN intended for analysis of fine structures of space radio sources at decameter wavelengths is considered. The phaser and sum-mator schemes of the radio telescope and its main parameters are presented.